

地盤永久変位を想定した PE 管光ファイバセンサの地上曲げ実験

A Bending Experiment of PE-Pipe Optical Fiber Sensor Which is Assumed to be Subjected to Permanent Ground Displacement

片桐 信 摂南大学理工学部 都市環境工学科
山中広大 摂南大学大学院理工学研究科

KATAGIRI, Shin Department of Civil and Environmental Engineering, Setsunan University
YAMANAKA, Koudai Graduate School Science and Engineering, Setsunan University

Abstract

In this study, the authors conducted bending experiments above ground using a PE-pipe optical fiber sensor under development for basic to measure permanent ground displacement. The estimated displacement perpendicular to the axis was compared with the actual displacement measured in experiments. The displacement was back-calculated according to the central difference from the measured bending strain. Next, the ground transformation was estimated from the back-calculated displacement. The FBG method was used in the present experiments to measure optical fiber strain.

キーワード: PE 管、光ファイバセンサ、地盤永久変位、

Keywords : PE-pipe, optical fiber sensor, permanent ground displacement

1. 研究の背景

都市の水供給処理・エネルギー供給を担うライフラインは、面的に広がるネットワークとなっており、地震により被害を受けた場合の社会的影響が極めて大きく、地震防災対策として迅速な回復が重要である。また、地震被害のすべてのメカニズムを究明し、ハード面のみでそれらに備えることには限界がある。ライフラインの機能障害を最低限に抑えるためには、地震後の早期に物理的被害を正確に推定する技術が必要となる。本法では重要度の高い既設埋設ライフラインに沿って「PE 管(ポリエチレン管)光ファイバセンサ」⁽¹⁾を平行に設置し、地震後にそのひずみ分布を検出することで、地盤永久変位の分布を逆推定し、その結果をもとに地震後の早期に既設ライフラインの損傷箇所を推定することを試みる。

2. 研究の概要

2-1 実験装置等の概要

光ファイバを PE 管に融着するための装置(図 1)を開発した。融着機はモーターで動く台車の上にヒーターを乗せた構造となっており、台車の先端には樹脂を押えるためのローラーが設置されている。台車を走らせる速度とヒーターの温度を変更しながら実験を行い、最適と思われる融着条件を見いだした。得られた条件で PE 管に FRP 外皮を有する光ファイバを融着し、図 2 に示す実験装置を用いて、地盤ばねと等価なバネを介して段差状の変位を与える地上曲げ実験を行った。また、変位算出値を逆推定⁽¹⁾することにより入力変位の推定を行った。変位は矢印の方向に油圧ジャッキで引張ることによって与えた。

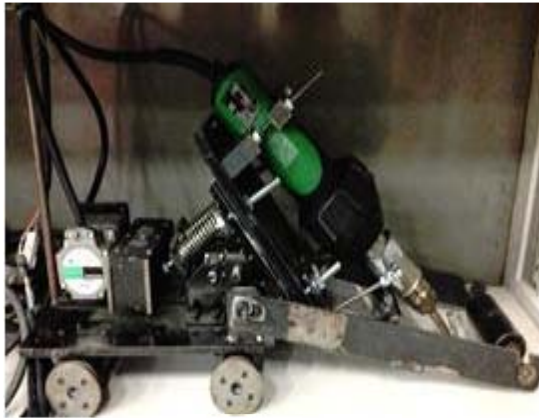


図 1 融着機



図 2 実験装置

2-2 PE 管光ファイバセンサの構造

現在開発が進められつつある PE 管光ファイバセンサの構造を以下の図 3 に示す。高密度 PE 管の表面に溝加工を施し、その中に FRP 被服を有する光ファイバを設置した後、光ファイバの表面と管表面とを溶融したポリエチレン樹脂により融着した構造となっている。溶着部の状況を以下の図 4 に示す。

光ファイバは管の上下・左右に設置されており、埋設環境下で地盤変形が生じ、PE 管光ファイバセンサに引張り・曲げが生じた際に発生する軸ひずみおよび曲げひずみを計測することで、地盤変位量の程度、地盤変位の発生個所を推定するものである。今回の実験では、水平方向にのみ変位を与えたので、左右にのみ光ファイバを設置している。

PE 材料は、非線形性の高い応力-ひずみ特性を有しているが、光ファイバの計測可能ひずみ 3% までは、おおむね線形挙動は示すと考えられる。

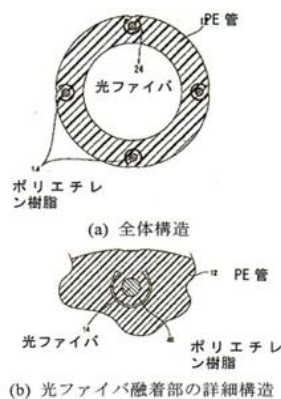


図 3 PE 管光ファイバセンサの構造

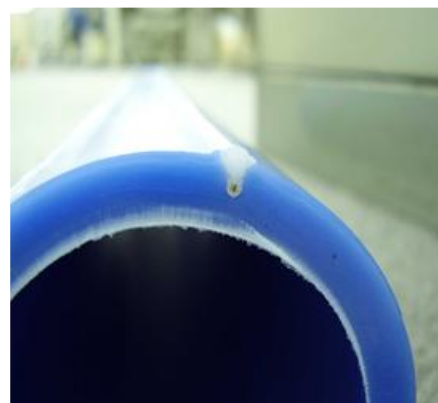


図 4 光ファイバ融着部

3. 計測ひずみからの PE 管変位分布算定法

まず、PE 管光ファイバセンサを既設埋設管に沿って平行に設置する。地震の発生後、地盤に永久変位が生じた場合、PE 管光ファイバセンサによりそのひずみを測定し、そのひずみを軸ひずみと曲げひずみに分解し、それぞれを積分することで、PE 管光ファイバセンサの軸方向変位、軸直角方向変位に変換することができる。

3-2-1 軸方向変位の算出

軸方向変位量については、計測軸ひずみ： ε_a に光ファイバセンサによる測点間隔(200mm)を乗じること、その間の変位増分が求められる。これを計測始点から累加することで、変位分布に変換することができる。

3-2-2 軸直角方向変位の算出

軸直角方向変位については、計測曲げひずみ： ε_b をもとに、図5に示す中心差分の考え方をを用いて、変位量に変換する。

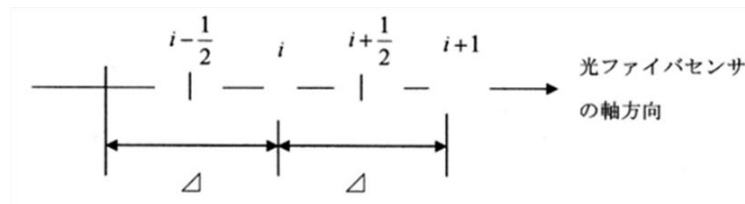


図 5 中心差分の考え方

計測曲げひずみ ε_b とすると、その点の曲げモーメント： M は下式となる。

$$M = \frac{2EI}{D} \cdot \varepsilon_b \quad (1)$$

一方、弾性曲線の微分方程式より $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{di}{dx} = -\frac{M}{EI} = -\frac{2}{D} \cdot \varepsilon_b$ である。ここで $\frac{d^2y}{dx^2} = y''$, $\frac{dy}{dx} = y'$ で表す。

PE 管光ファイバセンサによる計測ひずみは、計測間隔： $\Delta=200\text{mm}$ の離散化量である。中心差分の考え方をを用いると、次のように長手方向に逐次積分して、変位を求めることができる。

$$y'_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta} (y_{i+1} - y_i) \quad (2)$$

$$y''_i = \frac{1}{\Delta} (y'_{i+\frac{1}{2}} - y'_{i-\frac{1}{2}}) \quad (3)$$

(3)式より

$$y'_{i+\frac{1}{2}} = \Delta \cdot y''_i + y'_{i-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$y'_0 = 0$ として、本式により順次 $y'_{i+\frac{1}{2}}$ が求まる。ここで $y''_i = -\frac{2}{D} \cdot \varepsilon_b$ で(1/mm)の次元を持つ。

$y'_{i+\frac{1}{2}}$ は y'' に $\Delta(\text{mm})$ を乗じるので(rad)の次元を持つ。

(2)式より

$$y_{i+1} = \Delta \cdot y'_{i+\frac{1}{2}} + y_i \quad (5)$$

$y'_{i+\frac{1}{2}}$ が求まっているので、本式により順次 y_i が求まる。

4. 逆解析による地盤変位算出法

逆推定の方法は(6)式を用いた。

$$\delta = M \cdot d \quad (6)$$

ここで、 δ : PE 管の変位、 M : 影響係数マトリクス d : 入力変位である。(6)式の両辺に M^{-1} (影響係数マトリクスの逆行列)を乗じると式(7)となる。

$$M^{-1}\delta = d \quad (7)$$

つまり、PE 管の変位に影響係数マトリクスの逆行列を左から乗じると、未知量である入力変位を得ることができる。これは、PE 管のヤング率と地盤ばねに非線形性がないことを前提としている。

影響係数マトリクスの作成には、弾性床土のはり理論にもとづく解析ソフトを用い、例えば節点 1(端部)のみに軸直角方向へ 1mm の地盤変位を入力し解析すると、PE 管の変位が得られる。次に 2 番目の節点(スパン端点から \angle cm 間隔)だけに軸直角方向 1mm の地盤変位を入力し、計算する。この作業を節点 1 から節点 n まで順次行う。このデータの軸方向左側管体変位のみを取り出し、1 から n まで節点番号順に並べていくと 1 つの正方マトリクスが出来上がる。これが逆解析に必要な影響係数マトリクスである。

今回の実験では、PE 管の全長 4m、要素長(ばねの間隔) \angle 20cm で行ったので、21 行 21 列の影響係数マトリクスとなる。

5. ばねを用いた地上曲げ実験

5-1 実験概要

地上に設置した PE 管光ファイバセンサに矩形状に 2mm ずつ最大値 30mm の変位を与え、ワイヤー式変位計により計測された変位量と FBG⁽²⁾方式により計測されたひずみから算出した変位量を比較した。今回の実験には 4m の光ファイバに 200mm 間隔で FBG⁽²⁾センサを設けたものを用いた。ひずみゲージは FBG⁽²⁾センサと同位置に管軸方向に貼付けた。

実験装置は図 6 に示すように装置と PE 管との間をつる巻ばねで繋いでいる。つる巻ばねを地盤ばねと仮定し、地盤ばねが PE 管光ファイバセンサでの地盤変位検知に与える影響の程度を実測値と光ファイバからの算出値を比較し、評価した。

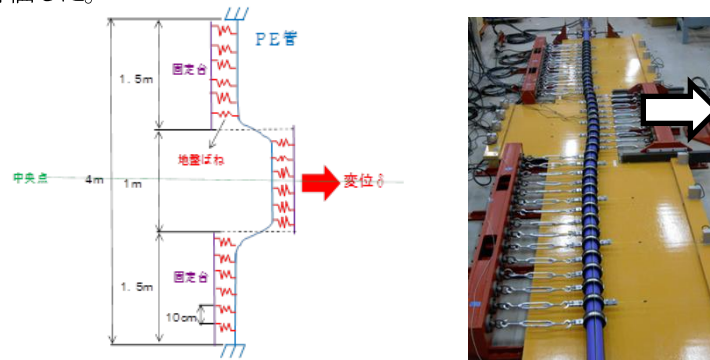


図 6 曲げパターン

5-2 計測ひずみから変位への変換

PE 管に矩形状に与え、光ファイバセンサにより Back, Front の 2 箇所それぞれひずみを計測する。配置は図 7 に示すとおりである。表 1 を用いて、Back と Front のデータから軸ひずみと曲げひずみを算出する。変位を与えた側を「Back」、反対側を「Front」とする。変位は矢印の方向に引張ること与えた。

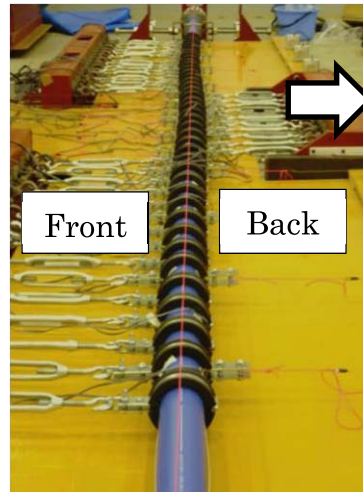


図 7 光ファイバセンサの配置

表 1 軸ひずみと曲げひずみへの変換

| 軸ひずみ ε_a | 曲げひずみ ε_b |
|--|--|
| $\frac{BACK \text{ 計測ひずみ} + FRONT \text{ 計測ひずみ}}{2}$ | $\frac{BACK \text{ 計測ひずみ} - FRONT \text{ 計測ひずみ}}{2}$ |

5-4 実験結果

全ての結果を付録に示す。

実験結果のうち、変位量が 2mm、30mm について例示する。

5-4-1 2mm の変位を与えた時の実変位と逆推定した変位量の比較

図 8 と図 9 に光ファイバセンサにより計測されたひずみとひずみゲージにより計測されたひずみとの比較を示す。光ファイバセンサから計測された Back ひずみ・Front ひずみともにひずみゲージより計測された値よりもわずかに大きな値となったがグラフの形状、ひずみどちらもおおむね一致し、光ファイバセンサにより良好にひずみが計測できた。

図 10 に Back ひずみと Front ひずみから算出した曲げひずみを示す。

図 11 は光ファイバセンサの計測値から算出された変位とワイヤー式変位計により計測された実測値を比較したものを示している。2m 地点での光ファイバセンサより算出された値は 2.8mm、ひずみゲージより求めた値は 2.2mm となり 0.6mm の誤差が生じている。実測値よりも光ファイバひずみから算出された値はわずかに大きな値となった。

図 12 は光ファイバ計測値から算出した変位から逆推定した変位と実入力変位を比較したものを示している。変位を与えた範囲で逆推定値が入力変位よりやや大きく推定される結果となったが、おおむね矩形上の変位が得られ、入力変位を逆推定することができた。

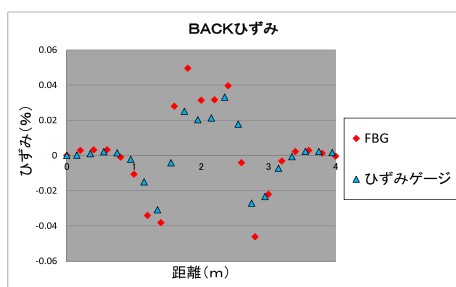


図 8 変位=2mm Back ひずみ

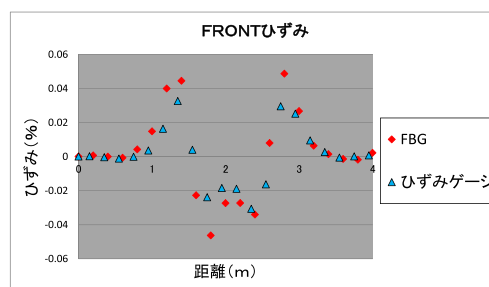


図 9 変位=2mm Front ひずみ

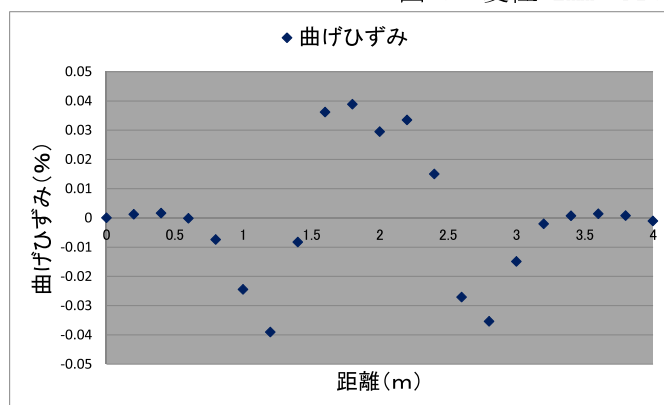


図 10 変位=2mm 曲げひずみ分布

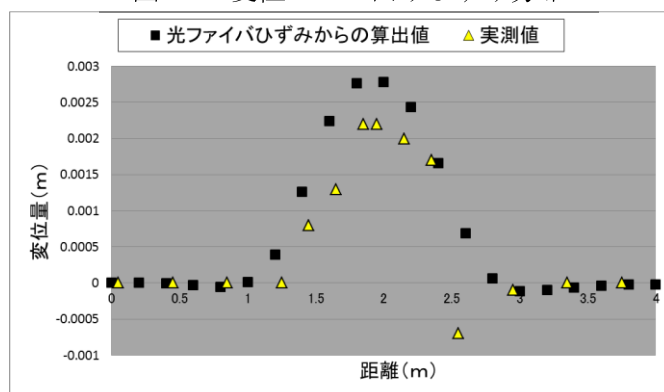


図 11 変位=2mm 曲げひずみから算出した変位分布と実測値

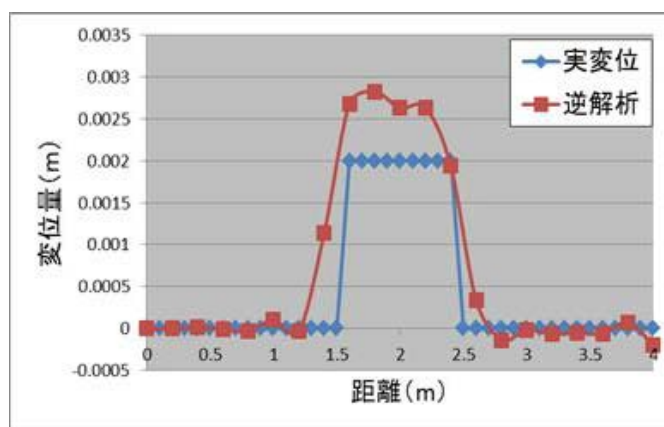


図 12 変位=2mm 実変位と逆解析値

5-4-2 30mm の変位を与えた時の実変位と逆推定した変位量の比較

図 13 と図 14 に光ファイバセンサにより計測されたひずみとひずみゲージにより計測されたひずみとの比較を示す。Front ひずみにおいては、おおむね一致した値が得られたが、Back ひずみでは 2.5m の地点で FBG センサ反射波長帯に重なり⁽²⁾が生じ、ひずみを計測できなかった。そのため前後のデータから補完してデータを生成したので、ひずみゲージ計測値と一致していない箇所がある。

図 15 に Back ひずみと Front ひずみから算出した曲げひずみを示す。

図 16 は光ファイバセンサの計測値から算出された変位とワイヤー式変位計により計測された実測値を比較したものを示している。Back ひずみの計測精度が良好でないため、光ファイバひずみから算出された変位量のグラフが左右対称になっておらず、最大値が実測値では 1.9m 地点であったが、光ファイバひずみからの算出値の最大値は 2.0m の地点という結果が得られた。

図 17 は光ファイバ計測値から算出した変位から逆推定した変位と実変位を比較したものを示している。変位が大きくなると変位を与えた範囲の中心で逆推定値が不安定になり誤差が生じたが、おおむね矩形の入力変位を逆推定することが出来ている。

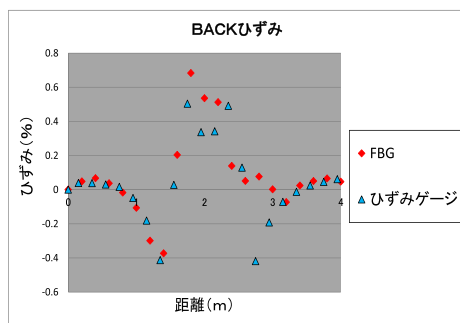


図 13 変位=30mm Back ひずみ

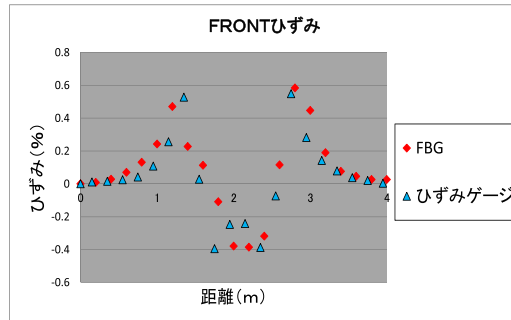


図 14 変位=30mm Front ひずみ

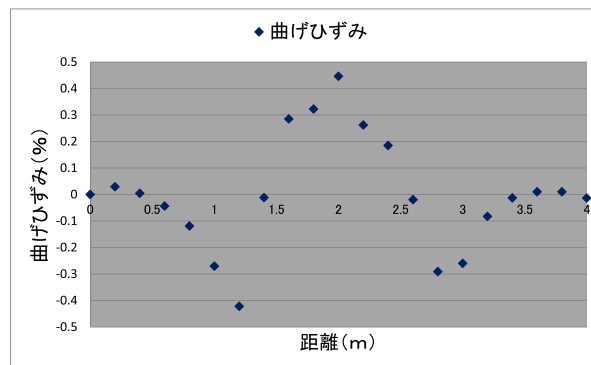


図 15 変位=30mm 曲げひずみ分布

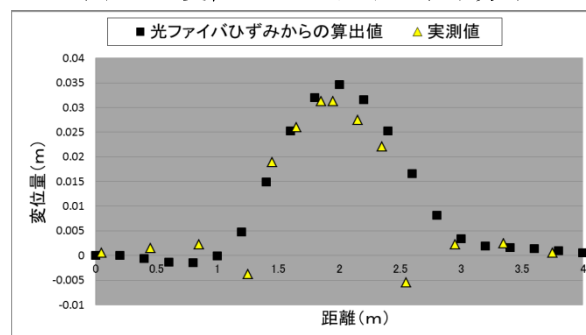


図 16 変位=30mm 曲げひずみから算出した変位分布と実測値

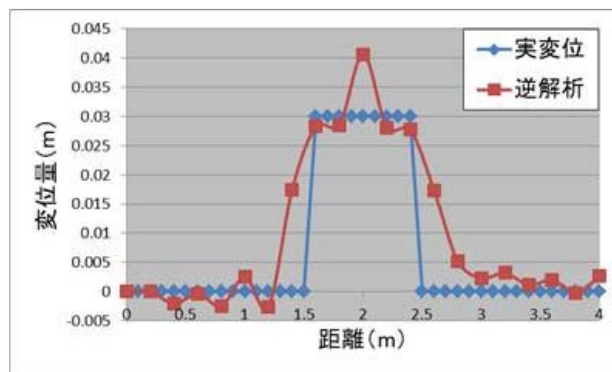


図 17 変位=30mm 実変位と逆解析値

6. まとめ

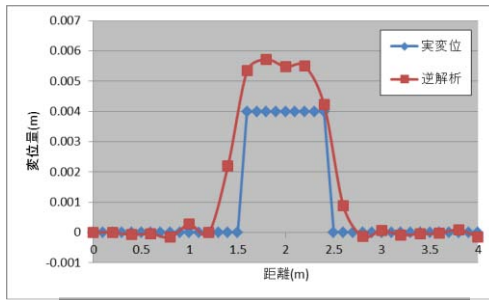
変位=2mm のときは Back ひずみ・Front ひずみともにひずみゲージより計測された値と比較して光ファイバセンサから計測されたひずみの方が少し大きな値が得られたもののひずみ分布の形状・ひずみどちらもおおむね一致しており変位にも精度よく算出できた。各 FBG⁽²⁾センサ反射波長帯が重ならないようにする必要があるが、今回の実験の変位=30mm の場合では、波長帯に重なりが生じ⁽²⁾データが計測できなかった個所があった。そのため、その点の前後のデータから補完してデータを生成した。その結果、Back ひずみの 2.5m～3.0m の地点でひずみゲージから計測された値と光ファイバセンサからの計測値が一致していないが、変位は変位計の値とおおむね一致している。

また、逆推定を行うと与えた変位と一致しない個所があった。この点に関しては、一本の光ファイバセンサに施す FBG⁽²⁾センサの測定チャンネル数を増加させることで反射波長が重なりづらくなり精度を向上できる可能性がある。また、FBG⁽²⁾加工を光ファイバセンサに 20cm 間隔で施したがより密に FBG⁽²⁾加工を施すことでさらに精度良く変位を推定できる可能性がある。

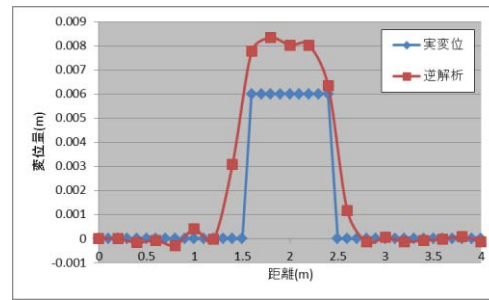
参考文献

- (1) 片桐 信, 小原昇吾, 「地盤永久変位に伴う埋設管路損傷個所の検知方法に関する研究」, 土木情報利用技術論文集, 19(2010), pp.1-10.
- (2) 「FBG 光ファイバセンシングの基本」, <http://www.ni.com/white-paper/11821/ja/#toc3>

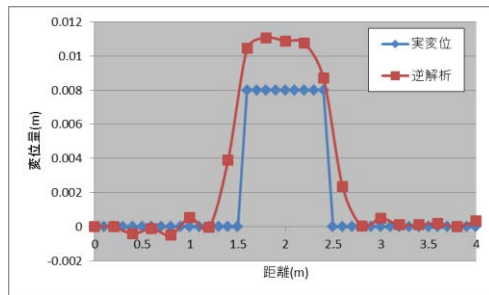
付録



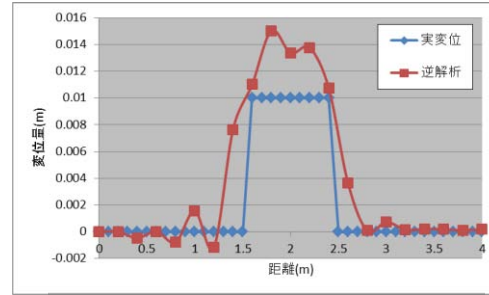
変位=4mm 実変位と逆解析



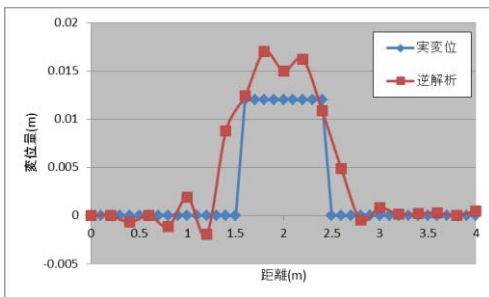
変位=6mm 実変位と逆解析



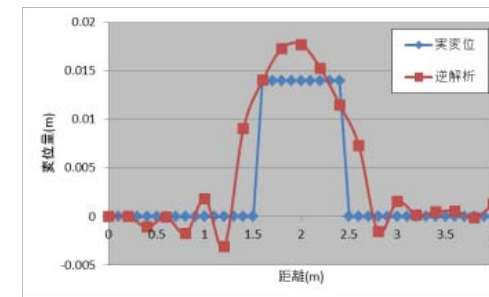
変位=8mm 実変位と逆解析



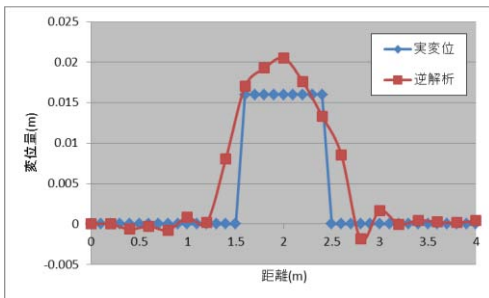
変位=10mm 実変位と逆解析



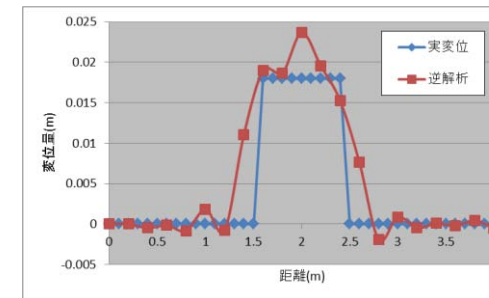
変位=12mm 実変位と逆解析



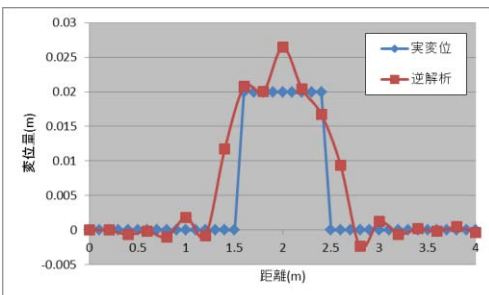
変位=14mm 実変位と逆解析



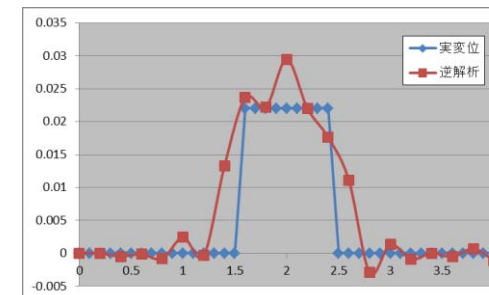
変位=16mm 実変位と逆解析



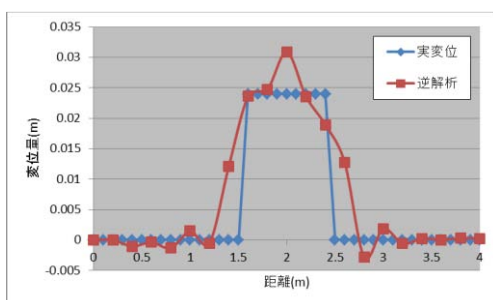
変位=18mm 実変位と逆解析



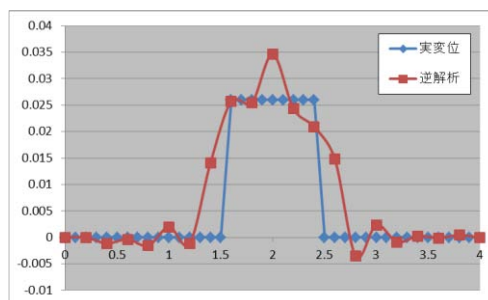
変位=20mm 実変位と逆解析



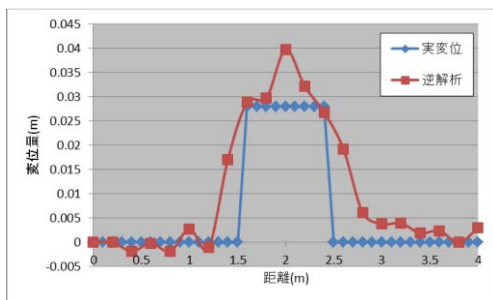
変位=22mm 実変位と逆解析



変位=24mm 実変位と逆解析



変位=26mm 実変位と逆解析



変位=28mm 実変位と逆解析

【原稿受付】2015 年 8 月 10 日、【掲載決定】2015 年 9 月 28 日

【著者連絡先】

片桐 信 摂南大学、教授 e-mail:shin-k@civ.setsunan.ac.jp
 〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8、摂南大学理工学部 都市環境工学科